

Stephan Hammes, Jan Krüger und Henning Meyer

# Semi-aktives Federungssystem für hydropneumatisch vollgefederte Traktoren

Nicht nur die Fahr- und Arbeitsgeschwindigkeit landwirtschaftlicher Traktoren, sondern auch der Transportanteil steigt kontinuierlich an. Dieser Trend erfordert eine höhere Fahrsicherheit und einen verbesserten Fahrkomfort. Um dies zu erreichen, muss die Fahrzeugfederung angepasst werden. Basierend auf einem Systemtraktor mit Starrachsen wurde eine hydropneumatische Federung aller Achsen entwickelt. Diese umfasst die erforderliche Sensorik, die hydraulischen Aktoren und eine semi-aktive, auf dem Skyhook-Prinzip beruhende Regelung in Echtzeit. Es konnte gezeigt werden, dass durch die kontinuierliche Dämpfungsregelung eine Anpassung an wechselnde Fahrsituationen bei verbessertem Fahrverhalten möglich ist.

## Schlüsselwörter

Traktor, Fahrsicherheit, Fahrkomfort, semi-aktive Federung, Hydropneumatik

damping ratio is based on the continuous Skyhook theory.

Consequently, the chassis suspension can be adjusted to any kind of road and speed to achieve an improved driveability.

## Keywords

tractor, driving safety, driving comfort, semi-active suspension, hydro-pneumatic

## Abstract

Hammes, Stephan; Krüger, Jan and Meyer, Henning

## Semi-active suspension system for hydro-pneumatic full spring mounted tractors

Landtechnik 66 (2011), no. 5, pp. 377–380, 5 figures, 1 table, 8 references

Not only the driving and operating speed of agricultural tractors but also the ratio of transport is increasing constantly. Because of that, higher driving safety and improved driving comfort are required. To achieve this, the tractor chassis suspension has to be adapted. Based on a tractor with conventional rigid axles a new hydro-pneumatic chassis suspension for front and rear axle, including a set of sensors, hydraulic actuators and an electronic real-time controller was developed. The used semi-active control algorithm of the

■ In der Landwirtschaft werden Traktoren immer häufiger zu Transportzwecken eingesetzt. Zusätzlich steigt die maximal mögliche Fahrgeschwindigkeit immer weiter an. Heutige Traktoren erreichen auf öffentlichen Straßen bis zu 80 km/h. Um trotz dieser Entwicklung eine ausreichende Fahrsicherheit und einen möglichst hohen Fahrkomfort unter Einhaltung von EU-Richtlinien und Gesetzen zu gewährleisten, kommt dem Federungssystem des Fahrzeugs eine immer größere Bedeutung zu.

Neben einer Sitz- und Kabinenfederung besitzen moderne Traktoren eine Vorderachsfederung, die meist hydropneumatisch ausgeführt ist [1]. Nur wenige Fahrzeuge, wie z. B. der JCB Fastrac, der Unimog oder selbstfahrende Feldspritzen, sind mit einer Vollfederung ausgestattet, bei der alle Achsen über eine Federung verfügen. Durch eine Vollfederung werden jedoch die für den Fahrer spürbaren Schwingungen auf ein Minimum reduziert.

Auf Grundlagen folgender Untersuchungen wurden das hydropneumatische Fahrwerk und die dazugehörige Regelung für diesen Versuch weiterentwickelt und anhand von reproduzierbaren Fahrversuchen auf ihre Funktion getestet. Die einzelnen Änderungen und deren Auswirkungen auf das Fahrverhalten werden anschließend erläutert.

Bei Versuchen von Scarlett, Price und Stayner wurden Traktoren mit verschiedenen Federungskonzepten miteinander verglichen, wobei das vollgefederte Fahrzeug die geringsten

Beschleunigungswerte aufwies [2]. Da für die Fahrsicherheit eine harte Federsteifigkeit und eine hohe Dämpfungsrate nötig sind, ein verbesserter Fahrkomfort dagegen durch eine weiche Federsteifigkeit und eine geringe Dämpfungsrate erzielt wird, muss eine fehlerfreie und präzise Anpassung der Federsteifigkeit und der Dämpfungsrate erfolgen. So wird gewährleistet, dass der Fahrer die ständige Kontrolle über das Fahrzeug hat und falsche Feder-Dämpfer-Werte nicht zu kritischen Fahrsituationen führen [3]. Um dies zu realisieren, sind neue Aktoren entwickelt worden. Bei verschiedenen Untersuchungen werden die Vorteile einer aktiven Federung gegenüber einem konventionellen System erkennbar. So zeigte Schäfer, dass die Fahrsicherheit bei einer langwelligen Sinusanregung mit einer aktiven Federung deutlich erhöht werden kann [4]. Auch Sarami, welcher die Auswirkungen einer on/off-Skyhook-Regelung mithilfe von Schwarz/Weiß-Ventilen auf das Fahrverhalten eines Traktors untersucht hat, demonstrierte die Überlegenheit einer aktiven Federung gegenüber einer passiven [5]. Die Ergebnisse der Versuche auf einer Vier-Stempel-Hydropulsanlage zeigen eine deutliche Erhöhung des Fahrkomforts [5].

### Aufbau des Federungssystems

Als Erprobungsfahrzeug diente der TU Berlin Trac, ein umgebauter Systemtraktor auf Basis eines MB-Trac 1600 Turbo. Bei der konstruktiven Umsetzung der Vorder- und Hinterachsfederung wurden möglichst viele Originalteile übernommen. Die Federn und Dämpfer der Vorderachsfederung wurden durch reibungsarme Hydraulikzylinder ersetzt, die ebenfalls an der von Hoppe [6] modifizierten Hinterachse verwendet werden. Die Führung der Hinterachse in horizontaler Richtung übernehmen Längs- und Querlenker.

**Abbildung 1** zeigt den Aufbau der hydropneumatischen Federung. Sowohl die Kolben- als auch die Ringseite der Zylinder (1) sind mit jeweils einem Membranspeicher (3) verbunden. Über dessen Gasdruck wird die Federsteifigkeit des Systems eingestellt. Zwischen diesen beiden Komponenten ist

ein Proportionalventil (2) angeordnet. Durch Einstellung des Drosselquerschnitts kann die Dämpfungsrate variiert und somit der Fahrsituation angepasst werden. Um nur den Einfluss des semi-aktiven Fahrwerks auf das Fahrverhalten auswerten zu können, verfügt der Traktor über keine weiteren Federungssysteme wie Sitz- oder Kabinenfederung.

### Aufbau des Regelungssystems

Der auf dem Skyhook-Prinzip basierende Regelalgorithmus ist in erster Linie auf maximalen Fahrkomfort ausgelegt. Ein passiver Dämpfer zwischen Chassis und Atmosphäre dissipiert die durch Fahrbahnunebenheiten aufgenommene Energie (**Abbildung 2, links**). Die Aufbaumasse wird so von der Fahrbahn entkoppelt und die Schwingungsbelastung reduziert. In der Praxis kommt ein verstellbarer, semi-aktiver Dämpfer zum Einsatz, der die Lage des Aufbaus durch Verstellung der Dämpfungsrate regelt (**Abbildung 2, rechts**). Dies geschieht im beschriebenen Federungssystem über eine stufenlose Änderung des Drosselquerschnitts der Proportionalventile zwischen Zylinder und Speicher.

Zur Erfassung der Beschleunigungswerte, anhand derer das Fahrverhalten beurteilt wurde, befand sich über jedem Rad an Achse und Aufbau ein Sensor. Da sich die zur Regelung notwendigen Geschwindigkeitswerte in vertikaler Richtung während der Fahrt nur sehr aufwendig messen lassen, wurden die Beschleunigungswerte softwareseitig integriert. Zur Erfassung dieser Sensorsignale dienten analoge Eingangsmodule, die mit A/D-Wandlern ausgestattet waren. Die Daten wurden an eine digitale I/O-Karte übergeben, in der eine logische Verschaltung der einzelnen Ein- und Ausgangskanäle per Software konfiguriert war (FPGA – Field Programmable Gate Array). Mithilfe des auf dem Controller in Form eines Realtime-Labview-Modells implementierten Algorithmus wurde die Einstellung der Proportionalventile ermittelt. Die geforderte Einhaltung der minimalen und maximalen Grenze der Dämpfungsrate wurde softwareseitig sichergestellt.

Abb. 1

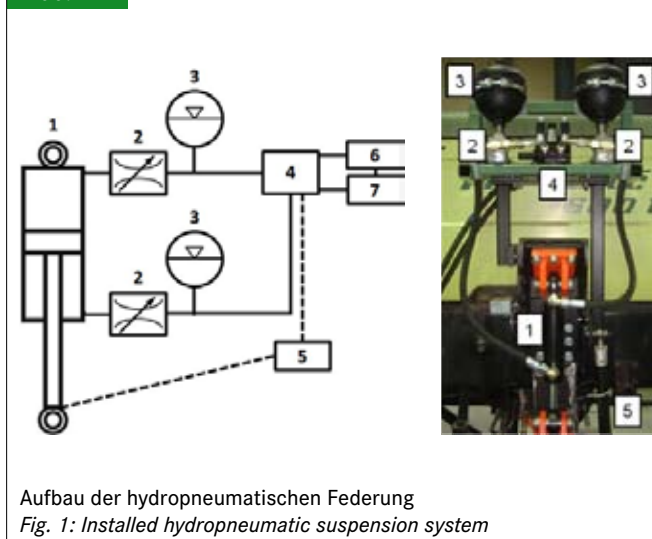
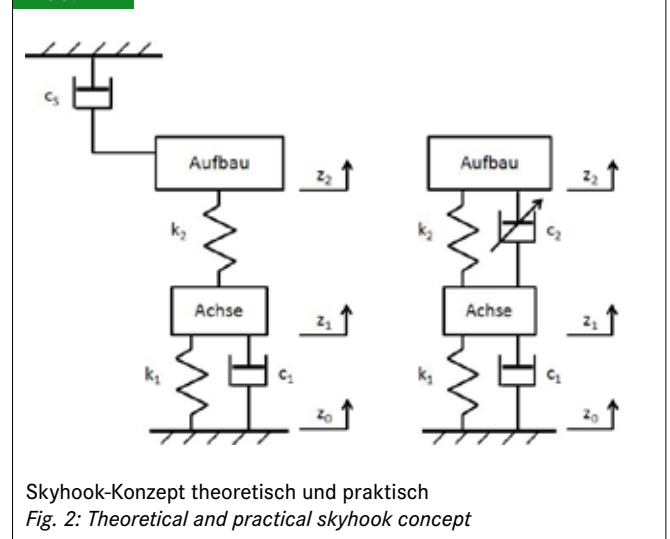


Abb. 2



Tab. 1

## Testparameter

Table 1: Tested parameters

Reifendruck Tire pressure	Konstant (1,4 bar vorne/1,6 bar hinten) Constant (1.4 bar front/1.6 bar rear)		
Fahrgeschwindigkeit Driving speed	7 km/h	11 km/h	14 km/h
Gefederte Achsen Sprung axles	keine Achse none	Vorderachse front axle	beide Achsen both axles
Ringseitiger Vorspanndruck Rod side preload pressure	63,7 bar (vorne/front) 69,8 bar (hinten/rear)	55 bar (vorne/front) 60 bar (hinten/rear)	80 bar (vorne/front) 85 bar (hinten/rear)
Passive Dämpfung Passive damping	minimal minimal	angepasst adapted	maximal maximal
Skyhook-Algorithmus Skyhook algorithm	on off	kontinuierlich continious	angepasst adapted

## Versuchsparameter

Die zur Untersuchung der Fahrsicherheit und des Fahrkomforts notwendigen Fahrversuche wurden auf dem Gelände der Wehrtechnischen Dienststelle in Trier durchgeführt. Bei der gewählten Strecke „Schweizerbahn“ handelt es sich um ein stochastisches Profil nach ISO 8608 mit unterschiedlicher Anregung der linken und rechten Fahrzeugseite [7]. Die Betonbahn hat eine Länge von 250 m und stellt einen Nebenweg bzw. leichtes Gelände nach. Die Unebenheiten beider Fahrspuren wurden zufällig generiert, wiesen keine Wiederholungen auf und beeinflussten sich in keiner Weise gegenseitig. Das Fahrzeug wurde auf der Teststrecke nicht nur zu Hub- bzw. Nickbewegungen, sondern auch zu Wankbewegungen angeregt.

Um das Fahrverhalten bei unterschiedlichen Fahrsituationen beurteilen zu können, wurden verschiedene Parameter am Fahrzeug variiert und deren Einfluss auf die Fahrsicherheit und den Fahrkomfort untersucht (Tabelle 1).

## Ergebnisse

Im Folgenden wird der Einfluss ausgewählter Parameter auf den Fahrkomfort erläutert. Zur Messung des Fahrkomforts wurden die Beschleunigungen am Sitz des Versuchsfahrzeugs in Fahrtrichtung (x), quer zur Fahrtrichtung (y) sowie in vertikaler Richtung (z) gemessen. Anschließend wurde jeweils der quadratische Mittelwert (RMS) gebildet. In den **Abbildungen 3–5** sind jeweils die z-Richtung sowie die Vektorsumme der drei Richtungen dargestellt.

## Einfluss der Fahrgeschwindigkeit

Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit wurde bei Geschwindigkeiten von 7, 11 sowie 14 km/h auf der Teststrecke untersucht. Das Fahrwerk war in diesem Versuch passiv geschaltet, d. h., die Proportionalventile hatten während des gesamten Versuchs einen konstanten Öffnungsquerschnitt. **Abbildung 3** zeigt, dass der RMS-Wert der Sitzbeschleunigung direkt von der Fahrgeschwindigkeit abhängt. Bei doppelter Fahrgeschwindigkeit er-

gibt sich nahezu eine Verdopplung der Beschleunigungswerte. Um die maximal zulässigen Expositionswerte für den Fahrer [8] nicht zu überschreiten, muss dementsprechend die maximale Geschwindigkeit reduziert werden.

## Vergleich von Vorderachs- und Vollfederung

Heutige Traktoren verfügen neben der Kabinen- und Sitzfederung häufig nur über eine Vorderachsfederung, um die Schwingungen auf das Chassis zu minimieren und gleichzeitig für ausreichend Bodenkontakt der Räder zu sorgen. Eine Vollfederung hat jedoch gegenüber dem ausschließlich an der Vorderachse gefederten Fahrzeug große Vorteile, wie in **Abbildung 4** deutlich wird. Die Beschleunigungen in vertikaler Richtung (z) können im Versuch mit dem vollgefederten Fahrzeug um 43 % reduziert werden. Zusätzlich sorgt eine Vollfederung dafür, dass auch die Räder der Hinterachse in kritischen Fahrsituationen nicht den Bodenkontakt verlieren.

Abb. 3

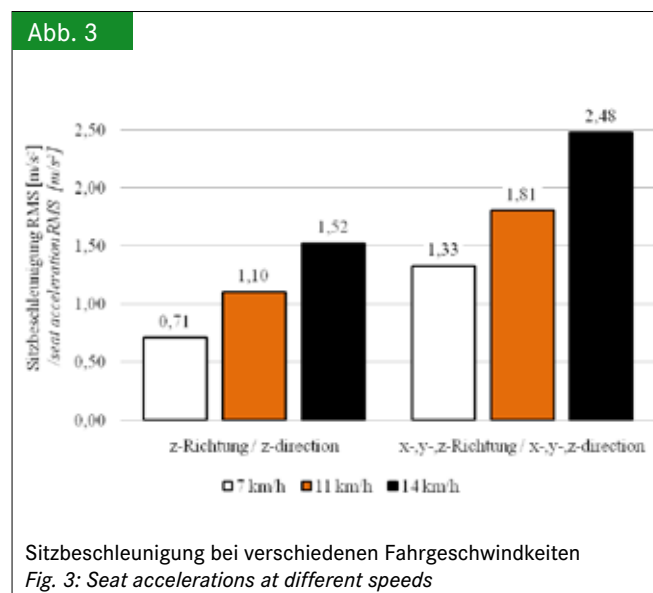
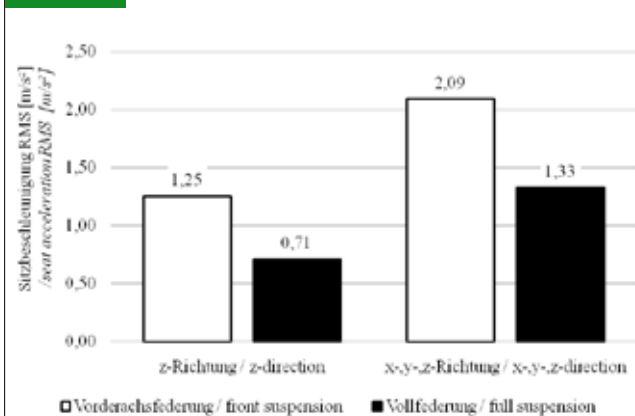
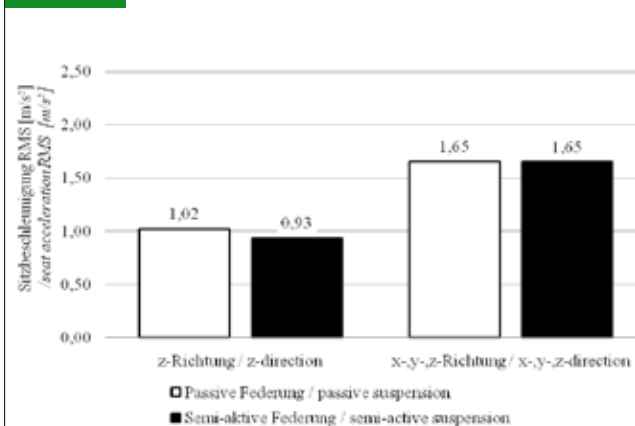


Abb. 4



Sitzbeschleunigung bei Vorderachs- und Vollfederung  
 Fig. 4: Seat accelerations with front and full suspension

Abb. 5



Sitzbeschleunigungen bei passiver und aktiver Federung  
 Fig. 5: Seat accelerations with passive and semi-active suspension

### Vergleich von semi-aktiver und passiver Federung

Wie in **Abbildung 5** zu sehen ist, kann die vertikale Beschleunigung am Fahrersitz durch ein semi-aktives Fahrwerk um etwa 8 % reduziert werden. Durch die auftretenden Wank- und Nickbewegungen, die in der aktuellen Version des Fahrwerkmanagementsystems noch nicht aktiv beeinflusst wurden, konnte in der Vektorsumme der drei Beschleunigungsrichtungen keine Verbesserung gemessen werden. Doch weitere Verbesserungen an der Sensorik sowie der Regelungsstrategie besitzen durchaus Potenzial, Sitzbeschleunigungen weiter zu reduzieren. Hierzu müssen Wank- und Nickbewegungen gezielt gemessen und beeinflusst werden.

### Schlussfolgerungen

Mit dem hydropneumatisch vollgedeferten Versuchsfahrzeug der TU Berlin lassen sich eine Vielzahl von Fahrwerkskonzepten und Parameter die den Fahrkomfort beeinflussen, gezielt un-

tersuchen. Die hier vorgestellten Ergebnisse machen deutlich, dass bei hohen Fahrgeschwindigkeiten, wie sie z. B. bei Transportfahrten vorkommen, konventionelle Federungskonzepte an ihre Grenzen stoßen. Weiterhin wurden die Vorteile, die mit einem vollgedeferten Fahrzeug hinsichtlich des Fahrkomforts zu erzielen sind, deutlich. Durch intelligente Regelungskonzepte kann eine Verbesserung des Fahrkomforts erreicht werden. Um das volle Potenzial des semi-aktiven Fahrwerks auszunutzen und den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit weiter zu steigern, werden weiterführende Arbeiten an der TU Berlin durchgeführt.

### Literatur

- [1] Renius, K. T.; Knechtges, H. (2006): Traktoren 2005/2006. Automobil-technische Zeitschrift 108 (9), S. 746-752
- [2] Scarlett, A. J.; Price, J. S.; Stayner, R. M. (2007): Whole-body vibration: Evaluation of emission and exposure levels arising from agricultural tractors. Journal of Terramechanics 44, p. 65-73
- [3] Els, P. S.; Theron, N. J.; Uys, P. E.; Thoresson, M. (2007): The ride comfort and handling compromise for off-road vehicles. Journal of Terramechanics 44, p. 303-317
- [4] Schäfer, E.; Jäker, K.-P.; Wielenberg, A. (2006): Aktive Federung für ein geländegängiges Nutzfahrzeug. Entwicklung und Inbetriebnahme. In: VDI Berichte Band 1931, S. 35-44
- [5] Sarami, S. (2009): Development and Evaluation of a Semi-active Suspension System for Full Suspension Tractors. Dissertation, Technische Universität Berlin
- [6] Hoppe, U. (2006): Einfluss der Hinterachsfederung auf die Fahrdynamik von Traktoren. Dissertation, Technische Universität Berlin
- [7] ISO8608, Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data. [http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=15913](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=15913), Zugriff am 22.08.2011
- [8] Richtlinie 2002/44/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 25. Juni 2002 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Vibrationen) (16. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 6.7.2002, L 177/13 - L 177/19

### Autoren

**Dipl.-Ing. (FH) Stephan Hammes** ist Mitarbeiter in der Entwicklung Unterwagen der Bucyrus HEX GmbH, Karl-Funke-Straße 36, 44149 Dortmund, E-Mail: [stephan.hammes@de.bucyrus.com](mailto:stephan.hammes@de.bucyrus.com)

**Dipl.-Ing. Jan Krüger** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Konstruktion von Maschinensystemen, Straße des 17. Juni 144, 10623 Berlin, E-Mail: [jan.krueger@tu-berlin.de](mailto:jan.krueger@tu-berlin.de)

**Dr.-Ing. Henning Meyer** ist Leiter des Fachgebietes Konstruktion von Maschinensystemen, an dem auch Herr Hammes als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig war, E-Mail: [henning.meyer@tu-berlin.de](mailto:henning.meyer@tu-berlin.de)

### Danksagung

Die Autoren danken der Firma Hydac Abteilung Mobiltechnik MT-E für die Unterstützung mit Sachmitteln und bei der Versuchstätigkeit.